

# 超声压电换能器工作频率的温度自动补偿系统研究

郑锡斌, 鲍 敏

(浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018)

**摘 要:** 超声压电换能器是中小口径超声波流量计的核心部件, 工作环境温度会直接影响超声压电换能器的最佳工作频率, 导致流量计计量不准确。以双通道超声波流量计为平台, 设计了一个超声压电换能器工作频率的温度自动补偿系统。通过实验获取不同工作环境温度下的超声压电换能器最佳工作频率, 并以性能最接近的两对超声压电换能器最佳工作频率的均值作为激励发射频率; 设计了一个激励脉冲信号发射系统, 根据工作环境温度通过查表法获取超声压电换能器的激励发射频率, 自动完成超声压电换能器工作频率的温度补偿。通过实验分析了温度补偿系统对流量计渡越时间和流量标定的影响, 结果表明: 该系统能够实现超声压电换能器温度自动补偿; 经过温度补偿的超声波流量计引用误差控制在 1.5% 之内, 达到二级精度仪表标准。

**关键词:** 超声波流量计; 压电换能器; 工作频率; 温度

**中图分类号:** TH714 **文献标志码:** A

## 0 引 言

超声波气体流量计是随着 IC 技术高速发展而开始得到实际应用的一种非接触式仪表<sup>[1]</sup>, 它具有适应性强、准确度高、测量范围宽等优点<sup>[2]</sup>。根据信号检测原理, 超声波气体流量计的检测方法主要分为: 传播速度差法、相关法、多普勒效应法、波速偏移法和噪声法。其中, 时差法是传播速度差法最为典型的一种检测方法, 主要通过测量超声波在流动流体中顺流与逆流的时间差来得到流速信息。

超声压电换能器是超声波流量计的重要组成部分, 主要将电信号转换为声波信号, 或者将声波信号转化为电信号, 广泛应用于超声马达、超声焊接、超声清洗等领域<sup>[3]</sup>。但是, 超声压电换能器容易受到外界因素影响, 不适宜在恶劣、不稳定的工作环境使用, 其中温度是一个关键影响因素<sup>[4]</sup>。在不同的温度下, 超声压电换能器的最佳工作频率会发生变化, 从而导致超声波流量计的接收波形发生改变, 引起流量计渡越时间的过零检测位置发生变化, 进而影

响超声波流量计的计量精度。针对这一现象, 余厚全等<sup>[5]</sup>从温度和压力出发, 通过 RLS 算法的自适应滤波对超声压电换能器传输特性进行校正; 黄峰等<sup>[6]</sup>则尝试使用最小均方误差 (LMS) 自适应滤波算法对超声压电换能器的传输特性进行补偿; Niewczas 等<sup>[7]</sup>运用单个光纤布拉格光栅键合到压电叠堆的技术, 对压电换能器进行温度补偿; Bjurström 等<sup>[8]</sup>利用二次谐波的剪切模式对工作在温度为 25~95℃ 的超声压电换能器进行性能分析和温度补偿。这些方法在运算量和可操作性上都存在较大难度, 本文通过改变超声波流量计的激励发射频率, 对超声压电换能器进行温度补偿, 进而调整流量计的信号过零检测位置, 降低计算要求, 实现系统低功耗; 通过实验分析温度补偿系统对流量计渡越时间和流量标定的影响, 以研究超声压电换能器工作频率的温度自动补偿系统的优劣。

## 1 系统设计

### 1.1 温度对换能器的影响机理分析

超声压电换能器的等效电路如图 1 所示, 其中

收稿日期: 2014-11-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51106141); 浙江省重点科技创新团队项目 (2011R09024)

作者简介: 郑锡斌 (1990-), 男, 浙江宁波人, 硕士研究生, 主要从事超声波流量计方面的研究。

通信作者: 鲍 敏, E-mail: mbao@zstu.edu.cn

$C_0$  为静态电容,  $L$ 、 $R$ 、 $C_1$  分别为动态电感、动态电阻和动态电容。当压电陶瓷振子机械损耗为 0 时, 振子的等效电阻等于 0, 此时振子输入阻抗与频率的关系式为:

$$Z = \frac{2\pi fL - 1/2\pi fC_1}{2\pi fC_0(2\pi fL - 1/2\pi fC_0 - 1/2\pi fC_1)} \quad (1)$$

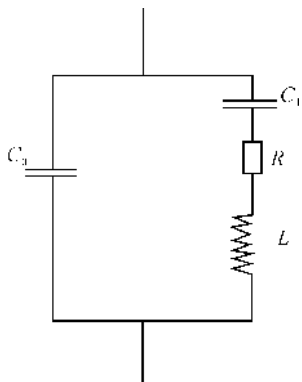


图1 超声压电换能器等效电路

由式(1)可得振子的最小与最大阻抗频率分别为:

$$f_m = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_1}} \quad (2)$$

$$f_n = \frac{1}{2\pi\sqrt{L\left(\frac{C_0C_1}{C_0+C_1}\right)}} \quad (3)$$

根据谐振理论, 在压电陶瓷振子最小阻抗频率  $f_m$  附近, 存在一个使信号电流与电压同相位的频率, 这个频率就是超声压电换能器的谐振频率(在本文实验中, 超声压电换能器需要进行配对工作, 两个不同换能器的谐振频率不可能绝对一致, 本文以最

佳工作频率作为配对超声压电换能器的性能指标参数); 同样在最大阻抗频率  $f_n$  的附近, 存在一个使信号电流与电压同相位的频率, 这个频率称为超声压电换能器的反谐振频率。

但是, 随着外界温度的变化, 等效电路的 4 个参数会发生相应改变。其中:  $C_0$ 、 $R$ 、 $C_1$  随着温度的升高而变大,  $L$  随着温度的升高而变小<sup>[6]</sup>。因此随着温度的变化,  $f_m$  和  $f_n$  数值也会发生相应改变, 导致超声压电换能器最佳工作频率的变化, 引起信号幅值与时域波形的改变。因此在实际应用中, 超声压电换能器的温度特性影响传输和测量精度。

## 1.2 系统设计

根据超声压电换能器这一特性, 实验以双通道超声波流量计为平台, 设计了一个激励脉冲信号发射系统, 以实现超声压电换能器的温度补偿。根据工作环境温度, 调整超声压电换能器激励发射频率, 发出超声波激励脉冲信号, 来调节信号过零位置, 并通过时差法计量样机流量。

### 1.2.1 系统的硬件电路设计

实验采用的激励方式为调幅与调频相结合的电压激励方式, 通过电压调幅使接收波形更加稳定, 并寻找电压频率突变点来锁定过零点。据此, 设计相应的激励和接收等电路。

#### a) 超声波激励信号电路设计

本设计选用 CD4052 作为模拟开关, 对外接电压进行选通, 超声波激励信号电路如图 2 所示。

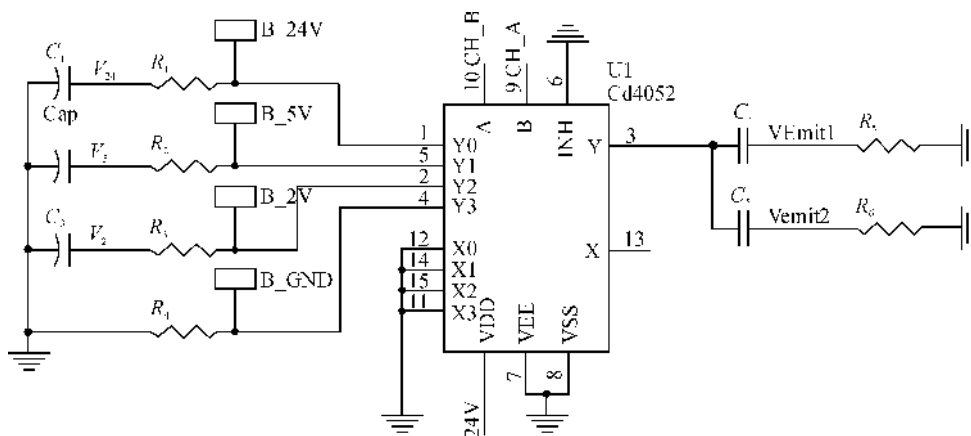


图2 超声波激励信号电路

超声波激励信号电路中,  $CH\_A$  和  $CH\_B$  负责芯片的选通工作,  $CH\_A$  和  $CH\_B$  的高电平必须大于 0.7VDD 以上才能有效控制 CD4052。因 CD4052 芯片的供电电压 VDD 为 24 V, 而 DSP 的 I/O 引脚电压只有 3.3V。如果  $CH\_A$  和  $CH\_B$  直接与 DSP

的 I/O 引脚相连, 会因 DSP 发出的控制信号太小而无法满足控制要求, 因此需对 I/O 引脚电压进行放大处理。本文设计的电路选用 2N3904 三极管芯片, 对 DSP 的 I/O 输出引脚电压进行放大, 电路如图 3 所示。

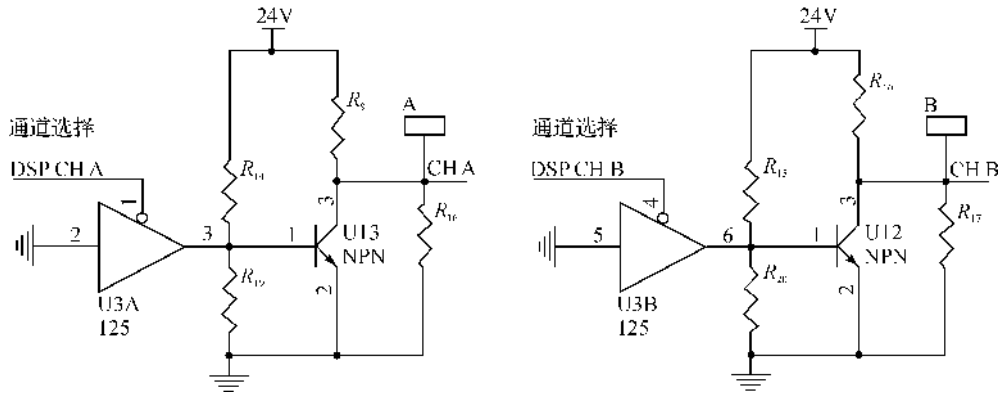


图 3 I/O 输出引脚电压放大电路

b) 超声波接收电路设计

发送换能器发射的超声波信号经过管道传播,信号已经受到严重衰减,通常只有几毫伏到几十毫伏,需对接收信号进行放大处理<sup>[9]</sup>。超声波频率较

大,放大芯片需要有足够的带宽,本文选用 NE5534 芯片对超声波接收信号进行两次放大,超声波接收放大电路如图 4 所示。

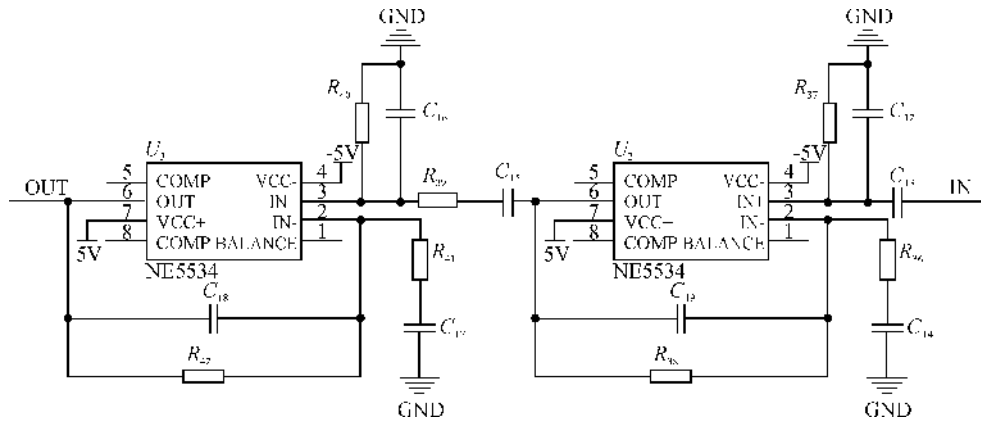


图 4 超声波接收放大电路

因 DSP 自带的 A/D 转换模块的引脚输入电压不能超过 3.3 V,需要合理的设置放大倍数,本电路放大倍数控制在 500 倍左右。

c) 温度检测电路设计

为了获取超声波流量计工作环境温度,采用三线法双恒流源的方案。通过恒流源产生一个 1 mA

的电流,作用于定值电阻和 Pt100 温度传感器上,可保证系统-50~100℃的测温范围。通过该方法产生的信号一般为毫伏级,需对小信号进行放大处理。本系统采用差分放大电路,最后通过 16 位的 A/D 转化模块对信号进行转化,并传到 DSP 进行后期处理,温度检测电路如图 5 所示。

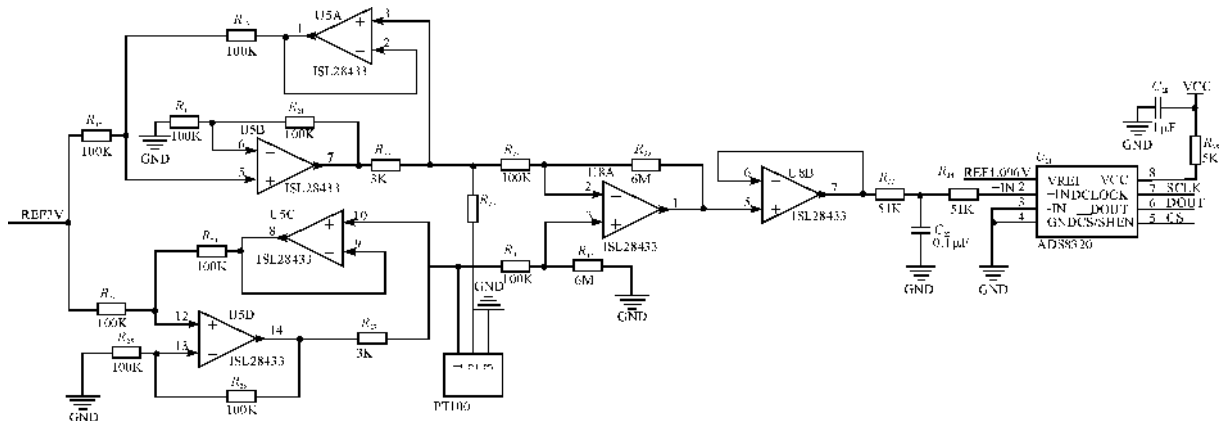


图 5 温度检测电路

温度检测电路中,A/D转换模块选用16位的ADS8320芯片,其 $SINAD$ (信纳比)为84 dB。根据 $ENOB$ (有效位数) $= (SINAD - 1.76) / 6.02$ ,可得出 $ENOB$ 约等于14位,满足本文的精度要求。

## 2 实验流程

### 2.1 温度-最佳工作频率测定

实验选用恒温箱、示波器、信号发生器等设备对超声压电换能器的温度-最佳工作频率特性进行研究。选取3对超声压电换能器,如图6所示,其最佳工作频率变化范围为 $200\text{ kHz} \pm 4\%$ 。配对换能器一个作为发送换能器,与信号发生器相连;另一个作为接收换能器,与示波器相连。



图6 超声压电换能器

安装固定超声压电换能器于流量计壳体声道,并把壳体置于恒温箱中进行加热。由于换能器材料本身不易导热,因此在不同的温度下,要求保持恒温箱加热不少于60分钟。当温度稳定后,设定信号发生器的工作频率为 $200\text{ kHz}$ 。通过信号发生器的频率扫描,观察示波器的电压峰值,得到该温度下超声压电换能器的最佳工作频率。

本文测定了8个不同温度,3对超声压电换能器的最佳工作频率,两者关系如图7所示。

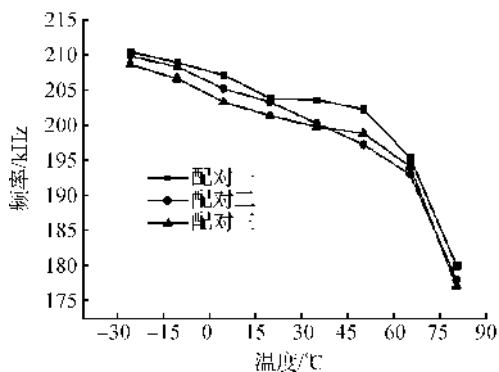


图7 温度与配对换能器最佳工作频率关系

由图7可见,超声压电换能器最佳工作频率随着温度的升高而降低,并且当温度达到一定程度,配

对换能器的最佳工作频率发生严重变化。当温度在 $-25 \sim 65^\circ\text{C}$ 之间时,超声压电换能器的最佳工作频率随着温度变化接近成线性关系,且每提高 $15^\circ\text{C}$ ,最佳工作频率相对 $-25^\circ\text{C}$ 时的最佳工作频率下降 $1.24\%$ 左右。而当温度超过 $65^\circ\text{C}$ 时,最佳工作频率随着温度的升高下降极为明显。

### 2.2 样机激励发送频率设定与温度补偿

本实验样机为双通道流量计,必须选用两对超声压电换能器。在不同的温度下,两对换能器的最佳工作频率不可能达到一致,因此选取两对换能器的最佳工作频率均值作为激励发送频率,且选用两对性能最接近的换能器提供样机使用。本文选用配对二和配对三,它们的温度-激励发送频率关系如图8所示。

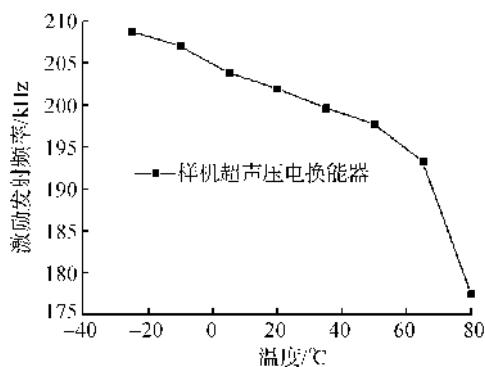


图8 温度-激励发送频率关系

Pt100温度传感器经过温度检测电路所得的电压信号与温度并不是简单的正比关系,很难通过具体公式表示两者关系。如果使用插值、拟合等方式进行数值计算,会给系统带来较大的计算量。对于实时响应要求很高的超声波气体流量计,过多的非线性运算会导致流量计计量缓慢。针对这一情况,本文采用查表法,实现超声压电换能器工作频率的温度自动补偿,提高系统的运算速度。

经过反复试验, $1^\circ\text{C}$ 的温差不会使接收信号波形发生巨变,因此可以设定一个温度范围。把与温度设定值温差在 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 之间的温度,设置成相同的激励发射频率。以 $20^\circ\text{C}$ 为例,检测工作环境温度为 $19.5^\circ\text{C}$ 和 $20.5^\circ\text{C}$ 时,系统的电压采集值,并以这两个电压值作为电压区间。当系统再次采集数据时,如果采集电压在该电压区间内,系统就以 $20^\circ\text{C}$ 的激励发射频率发出超声波信号。

将需要设定的温度值和与之对应的电压信号、激励发送频率按顺序分配方式存入存储器,构成一个线性表。当系统采集数据时,DSP通过采集数据的电压值,得到此时工作环境温度,匹配相应的激励

发射频率,自动完成超声波激励信号的发射。本文对 8 个不同温度进行了多次检测,所得数据以查表法形式进行存储,如表 1 所示。

表 1 不同温度的检测数据

温度值 设定/℃	电压采集 平均值*/V	电压采集 平均值*/V	激励发射 频率/kHz
-25	0.5798	0.6039	209.20
-10	0.9332	0.9598	207.45
5	1.2876	1.3097	204.25
20	1.6363	1.6625	202.35
35	1.9870	2.0085	200.05
50	2.3345	2.3558	198.10
65	2.6804	2.7017	193.65
80	3.0229	3.0477	177.75

注:第二列和第三列分别为温度比温度设定值小 0.5℃ 和大 0.5℃ 时,电压采集值的平均值。

### 2.3 信号渡越时间检测

超声波流量计渡越时间检测通常选用阈值检测和过零检测相结合的方案<sup>[10]</sup>。但在实际情况下,气体超声波流量计的超声波信号受到流体密度、流体速度等外界因素影响,极易发生信号波动。因此不能采用水超声波流量计中成熟的阈值法渡越时间测量方案,该测量方案通过检测阈值电压之后第一个或者第二个过零点进行信号渡越时间检测。本实验在此基础上做了改进,采用激励发射频率紧跟 1.15 倍于激励发射频率的激励脉冲方式,通过阈值电压和电压频率突变点相结合的检测方式,使用频率突变点之后第二个过零点进行过零检测,得到信号渡越时间,激励脉冲信号如图 9 所示。另外,相邻两个

激励发射信号的时间间隔约为 1.5ms,防止发射信号间隔过短而导致相邻信号相互激振。

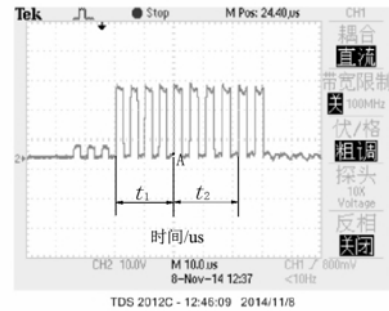


图 9 激励脉冲信号波形

图 9 中,A 点为激励信号电压突变点, $t_2/t_1=1.15$ 。选择 1.15 作为倍数参数,主要由于过高或者过低的倍数,会导致突变点之后的激励信号频率因为过于远离此时超声压电换能器的激励发射频率,而导致接收信号过于微弱,达不到检测要求。

## 3 实验结果与分析

### 3.1 超声压电换能器温度补偿

这里讨论超声压电换能器工作在零流量、标准状况下,工作环境温度为 50℃ 时的温度补偿,接收信号采集波形如图 10 所示。其中图 10(a)为 20℃ 下,超声压电换能器工作在自身激励发射频率时的接收波形,图 10(b)、10(c)分别为 50℃ 下,超声压电换能器工作在 20℃ 激励发射频率和经过温度补偿后的接收波形。

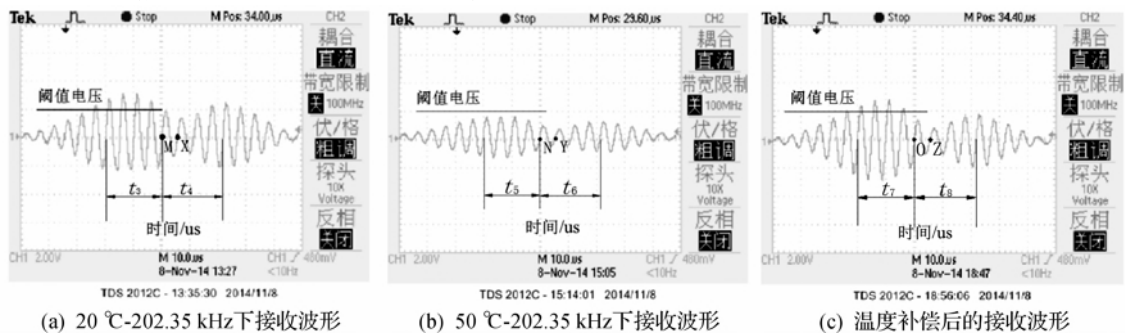


图 10 接收信号采集波形

图 10 中,M、N、O 点为接收波形的电压频率突变点;X、Y、Z 点为过零检测点,是电压频率突变点之后的第二个过零点。为了降低 CPU 功耗,先不进行电压频率突变点的检测工作。当系统检测到阈值电压后,触发该任务,并寻找频率突变点之后第二个过零点进行过零检测。在过零检测完成之后,再次关闭电压频率突变点的检测任务。

从图 10(b)不难发现,未进行温度补偿的超声

压电换能器接收波形最大幅值小于阈值电压,不能通过检测阈值电压进行电压频率突变点的检测工作,导致过零检测点 Y 漏检。而由图 10(c)可见,超声压电换能器经过温度补偿之后,接收波形最大幅值大于阈值电压,能够通过检测阈值电压进行电压频率突变点的检测工作,并以突变点之后第二个过零点进行过零检测,获得信号渡越时间。因此,本系统设计的超声激励信号发射系统达到预期效果,超

声压电换能器的温度补偿工作达到较好效果。

### 3.2 超声波流量计流量标定

针对本样机的流量标定,基准流量来自 0.5 级涡轮流量计。由文献[11]可知,通过计算流体沿轴线方向的平均速度  $V_z$ ,并结合流量修正系数  $K$ ,可得沿管道截面的平均速度  $V=K \cdot V_z$ 。在湍流状态下,流量修正系数  $K=2n/(2n+1)$ ,在流体雷诺数为 4000 时, $n$  取 5.00。

本文选用 TMS320F2812 的一个 CPU 定时器,计时系统的渡越时间,并设定芯片主频为 150MHz。给出工作环境温度 50℃时,未进行温度补偿和进行温度补偿的超声波流量计标定结果,如表 2 所示。其中未进行温度补偿的流量计,激励发射频率为 20℃的设定值。由于篇幅所限,这里每组只列出 3 个计量结果,在实际测量中这是远远不够的。

表 2 流量计计量数据

基准流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	顺流定时 器计数值	逆流定时 器计数值	顺流逆流定时 器平均计数差	平均速度 $V/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
60(未进行 温度补偿)	0	0		
	0	0		(无法测量)
	0	0		
60(经过温 度补偿)	58699	59201		
	58639	59260	54	2.1746
	58653	59192		
108(未进行 温度补偿)	0	0		
	0	0		(无法测量)
	0	0		
108(经过温 度补偿)	58467	59409		
	58406	59367	79	3.8446
	58416	59449		
146(未进 行温度偿)	0	0		
	0	0		(无法测量)
	0	0		
146(经过 温度补偿)	58293	59583		
	58248	59548	338	5.2554
	58206	59629		
203(未进 行温度偿)	0	0		
	0	0		(无法测量)
	0	0		
203(经过 温度补偿)	58028	59852		
	58006	59803	805	7.0904
	58051	59846		

注:无法测量是由于顺流定时器计数值或逆流定时器计数值为 0 导致。

由表 2 可见,未进行温度补偿的超声压电换能器极易导致接收信号过零检测点的漏检,使流量计计量失败。通过温度补偿,能有效避免过零检测点漏检的现象。同时,经过温度补偿的流量计引用误

差基本控制在 1.5% 以内,达到计量精度要求。当工作环境温度为 50℃,经过温度补偿的流量计标定误差分析如表 3 所示。

表 3 50℃ 流量计标定误差分析

基准流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	基准流速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	流速示值误差/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	引用误差/%
60(50℃)	2.1231	0.0515	0.717
108(50℃)	3.8217	0.0229	0.319
146(50℃)	5.1663	0.0891	1.240
203(50℃)	7.1833	-0.0929	1.293

## 4 结 论

本文设计了一个根据工作环境温度自动调整超声压电换能器激励发射频率的信号发射系统,完成超声压电换能器工作频率的温度补偿;并通过实验分析了温度补偿系统对流量计渡越时间和流量标定的影响。实验结果表明,该系统能够很好克服因工作环境温度变化,导致超声压电换能器最佳工作频率改变的缺点;流量计流量标定结果进一步证明该系统的优越性,计量精度达到规定要求。

对超声压电换能器的补偿,只考虑温度是远远不够的,超声压电换能器的性能还受到外部应力等因素的影响。同时,工作环境温度变化不但影响超声压电换能器的最佳工作频率,引起信号幅值的变化,信号的时域波形也会发生相应改变,导致过零检测点的位置偏移。如何解决这些问题有待于进一步实验研究。

### 参考文献:

- [1] 刘志魁,张 华,刘 涛,等. 工业流量仪表选型分析[J]. 山东冶金,2011,33(6).
- [2] 李占平,台 畅. 管道超声波气体流量计的设计与实现[J]. 煤炭工程,2013,45(9):125-127.
- [3] 桑永杰. 大尺寸压电超声换能器的特性研究及有限元仿真[D]. 西安:陕西师范大学,2007:1-3.
- [4] 胡新伟. 大功率压电超声换能器的非线性研究[D]. 西安:陕西师范大学,2007:18-20.
- [5] 余厚全,黄载禄,屈万里. 基于 RLS 算法的超声换能器温度压力特性校对[J]. 仪器仪表学报,1997,18(4):378-383.
- [6] 黄 峰,金生龙,吴家瑜,等. 基于 LMS 的超声换能器温度补偿仿真[J]. 传感器世界,2011,17(5):19-22.

- [7] Niewczas P, Dziuda L, Fusiek G, et al. Temperature compensation for a piezoelectric fiber-optic voltage sensor [C] // Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2006. IMTC 2006. Proceedings of the IEEE. IEEE, 2006;1994-1998.
- [8] Bjurström J, Wingqvist G, Yantchev V, et al. Temperature compensation of liquid FBAR sensors[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2007, 17(3):651.
- [9] 董登辉, 鲍敏, 郑锡斌. 基于电压调幅的超声波流量计研究[J]. 机电工程, 2014, 31(2):195-198.
- [10] 司君国, 李京华. 科式流量计数字闭环幅值检测算法研究[J]. 电子设计工程, 2014, 22(16):85-87.
- [11] 李跃忠. 多声道超声波气体流量测量关键技术研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2007:33-38.

## Study on Automatic Temperature Compensation System of Operating Frequency of Ultrasonic Piezoelectric Transducer

ZHENG Xi-bin, BAO Min

(School of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** The ultrasonic piezoelectric transducer is the core component of the ultrasonic flowmeter with medium and small diameter. The operating ambient temperature will directly influence the optimum operating frequency of ultrasonic piezoelectric transducer, thus leading to inaccurate measurement of flowmeter. The paper regards a dual-channel ultrasonic flowmeter as the platform to design a automatic temperature compensation system of operating frequency of ultrasonic piezoelectric transducer. The optimum operating frequency of transducer at different temperature is gained by experiments. The mean value of optimum operating frequency of two pairs of ultrasonic piezoelectric transducers serves as the stimulated emission frequency to design an excitation pulse signal transmitting system. The stimulated emission frequency of ultrasonic piezoelectric transducer is gained according to operating ambient temperature by meter checking method so as to automatically complete temperature compensation of operating frequency of ultrasonic transducer. Then, the paper analyzes the effect of temperature compensation on transit time and flow calibration of ultrasonic flowmeter by the experiment. The result shows that the system can achieve the automatic temperature compensation of transducer. The measurement error of ultrasonic flowmeter can be controlled within 1.5% through the temperature compensation, achieving the requirement of the secondary standard of precision.

**Key words:** ultrasonic flowmeter; piezoelectric transducer; operating frequency; temperature

(责任编辑: 康 锋)